

E.T.S. de Ingeniería Industrial, Informática y de Telecomunicación

Simulación y estudio en SolidWorks de la cadena cinemática de un motor diésel mono-cilíndrico y de ese mismo motor modificado



Grado en Ingeniería Mecánica

Trabajo Fin de Grado

Quintero Martínez, Pablo

Gil Del Val, Alain

Urroz Unzueta, José Carlos

Pamplona, fecha de defensa del 22/06/2015

al 30/06/2015

upna
Universidad
Pública de Navarra
Nafarroako
Unibertsitate Publikoa



Simulación y estudio en Solid Works de la cadena cinemática de un motor diésel mono-cilíndrico y de ese mismo motor modificado.

19 de Junio del 2015

RESUMEN DEL PROYECTO

A lo largo de este documento se expondrá detalladamente tanto la metodología como los procedimientos que se han llevado a cabo para diseñar el modelo 3D, en el programa de diseño mecánico Solid Works, del motor de combustión interna alternativo diésel SD60 de Genergy, así como el modelo de este mismo motor tras su modificación.

Partiendo de los planos realizados en el Trabajo Fin de Grado titulado *“Estudio geométrico de la cadena cinemática de un motor diésel mono-cilíndrico modificado”*, realizado por Iñigo Echeverría Amescua, y apoyándome en las simplificaciones e hipótesis ya asumidos por este trabajo, se explicará paso a paso el traspaso al modelo 3D de cada una de las piezas, del motor diésel real y del motor modificado, así como las simplificaciones realizadas y las hipótesis asumidas durante la implementación en CAD.

Una vez el modelo individual de las piezas, se desarrollará el proceso de ensamblaje en el que se mostrarán las relaciones entre los diferentes elementos de la cadena cinemática. Nuevamente se expondrán las simplificaciones e hipótesis asumidas durante el proceso de ensamblaje tanto para el motor diésel real como para el modificado. Así mismo también se mostrarán las simulaciones de los movimientos relativos de las diferentes partes de las distintas cadenas cinemáticas modeladas.

Como objetivo final, este proyecto persigue la consecución de un diseño 3D lo más aproximado posible al conjunto real, con la meta de poder realizar simulaciones del ciclo termodinámico real en este mismo programa (SolidWorks).

PALABRAS CLAVE

- Motor
- Cadena cinemática
- Diésel
- Simulación
- CAD



PROJECT RESUME

Throughout this document will be discussed in detail the methodology and procedures that have been carried out to design the 3D model, in the mechanical design software Solid Works, of the SD60 diesel engine of Genergy as well as the model of the same engine after a modification.

Starting from the plans made in the Final Degree Project titled *“Study of the Kynematic chain of a modified single cylinder diesel engine”*, done by Iñigo Echeverría Amescua, and leaning on simplifications and assumptions already made by this work, will be explained step by step the move to the 3D model each of the parts of both engines, as well the simplifications and assumptions made during the implementation in CAD.

After the individual model parts, the assembly process in which the relationships between the different elements of kinematic chains are displayed develop. Again will be explained the simplifications and assumptions made during the assembly process for both engines. Also simulations of relative movements of the different parts of the various kinematic chains modeled are also displayed.

As a final goal, this project aims to achieve a 3D design as close as possible to the actual set, with the goal of being able to perform simulations of the real thermodynamic cycle in the same program (SolidWorks).

KEYWORDS

- Engine
- kinematic chain
- Diesel
- Simulation
- CAD



ÍNDICE

1.INTRODUCCIÓN	6
1.1. ANTECEDENTES	6
1.2. OBJETIVOS	7
 2.IMPLEMENTACIÓN EN SOLIDWORKS	8
2.1. ÁRBOL DE LEVAS.....	8
2.2. ÁRBOL DE LEVAS MODIFICADO	9
2.3. BIELA.....	10
2.4. BULÓN	12
2.5. CHAVETA ÁRBOL DE LEVAS	12
2.6. CIGÜEÑAL.....	12
2.7. EJE DE CONTRAPESOS	14
2.8. ENGRANAJE DEL ÁRBOL DE LEVAS	15
2.9. PALPADOR	16
2.10. PERNO DE UNIÓN BIELA-SOMBRERETE	16
2.11. PISTÓN.....	17
2.12. SEGMENTOS	18
2.13. SEMICOJINETE	18
2.14. SOMBRERETE.....	19
2.15. TOPE DE LAS VÁLVULAS	20
2.16. VÁLVULAS DE ADMISIÓN Y ESCAPE	20



Simulación y estudio en Solid Works de la cadena cinemática de un motor diésel mono-cilíndrico y de ese mismo motor modificado.

19 de Junio del 2015

2.17. CILINDRO 21

2.18. PIEZAS NORMALIZADAS 23

3.ENSAMBLAJES DE LAS CADENAS CINEMÁTICAS DEL MOTOR DIÉSEL REAL Y DEL MOTOR MODIFICADO 24

3.1. DESARROLLO DE LA CADENA CINEMÁTICA DEL MOTOR DIÉSEL REAL .. 28

3.2. CONFIGURACIÓN DE LA CADENA CINEMÁTICA DEL MOTOR MODIFICADO
..... 32

**4.ANALISIS DE MOVIMIENTO DE LA CADENA CINEMÁTICA DEL MOTOR DIÉSEL REAL
..... 33**

4.1. ADMISIÓN..... 33

4.2. COMPRESIÓN 37

4.3. COMBUSTIÓN/EXPANSIÓN 37

4.4. ESCAPE..... 38

**5.ANALISIS DE MOVIMIENTO DE LA CADENA CINEMÁTICA DEL MOTOR MODIFICADO
..... 42**

5.1. ADMISIÓN-EXPANSIÓN 42

5.2. ESCAPE..... 45

**6. SIMULACIÓN DE FLUJOS EN LA CONFIGURACIÓN DEL MOTOR MODIFICADO
..... 48**

6.1. SIMULACIÓN DE ADMISIÓN 49

6.2. SIMULACIÓN DEL CRUCE DE VÁLVULAS..... 52



Simulación y estudio en Solid Works de la cadena cinemática de un motor diésel mono-cilíndrico y de ese mismo motor modificado.

19 de Junio del 2015

7.DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	55
8.NUEVAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN	56
9.AGRADECIMIENTOS.....	57
10. REFERENCIAS	58
10.1. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58
10.2. LISTA DE FIGURAS.....	58
10.3. LISTA DE TABLAS.....	63



1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

Previo al desarrollo de este Trabajo Fin de Grado, se llevaron a cabo otros dos proyectos en relación con el motor SD60 de Genergy, que son los que dotan a este de sentido útil y práctico.

El primero de los trabajos es el realizado por Raquel Munuera Lario, descrito en el Proyecto Final de Carrera titulado *“Modificaciones de un motor de combustión interna alternativo diésel para su funcionamiento con aire a presión”*.

En el que se realizaron las modificaciones mecánicas pertinentes en el motor de combustión interna alternativa diésel SD60 de Genergy para que pudiera trabajar con aire a presión como fluido de trabajo sin necesidad ningún tipo de combustible. También el motor pasó de realizar un ciclo termodinámico de cuatro tiempos, a uno de dos, debido a la modificación de su árbol de levas original. Además, se presentaron las diferencias principales de funcionamiento, diferencias entre elementos, las ventajas y desventajas entre el motor real y el modificado.

Este trabajo apoya una futura línea de investigación. Por lo tanto, resulta de gran interés el tener un modelo 3D del motor, con el que poder trabajar en paralelo realizando diferentes pruebas, cálculos y análisis, siempre que la diferencia con la realidad no suponga una distancia insalvable y este arroje resultados con errores mínimos.

El segundo de los trabajos, que ya ha sido nombrado con anterioridad en el resumen, fue el realizado por Iñigo Echeverría Amescua, en el Trabajo Fin de Grado titulado *“Estudio geométrico de la cadena cinemática de un motor diésel mono-cilíndrico modificado”*.

En esta continuación de la línea de investigación emprendida por el trabajo anterior, un motor SD60 de Genergy fue desmontado paso a paso, sustrayendo toda la información esencial necesaria para constituir al completo la cadena cinemática. Además, se midieron todas y cada una de las cotas y geometrías necesarias de las diferentes piezas para poder realizar los planos técnicos de las mismas, con el claro objetivo de modelizarlas después en la plataforma 3D SolidWorks. Por último, se estudiaron las diferentes piezas y se concretaron su peso y material para una posterior comparación con los diseños en 3D.



1.2. OBJETIVOS

1. Implementación en el software de diseño gráfico SolidWorks de cada uno de los elementos de la cadena cinemática del motor de combustión interna alternativa diésel modelo SD60 de Genergy y de los elementos que difieran, del motor modificado.
2. Ensamblaje de los distintos elementos de la cadena cinemática del motor diésel real para configurar el conjunto virtual.
3. Sustitución de las piezas diferenciadoras de la cadena cinemática modificada en ensamblaje real para configurar la cadena cinemática modificada.
4. Desarrollo, estudio, comparación y discusión del movimiento cinemático de los ensamblajes, real y modificado, virtuales entre sí, y con sus respectivos reales.
5. Reproducir, estudiar y comparar el ciclo termodinámico del vapor en el ensamblaje virtual del motor modificado con el ciclo real estudiado en el Proyecto Final de Carrera realizado por Raquel Munuera Lario titulado *“Modificaciones de un motor de combustión interna alternativo diésel para su funcionamiento con vapor a presión”*.
6. Abrir una amplia gama de nuevas líneas de investigación y desarrollo, que continúen, amplíen y mejoren los objetivos conseguidos en torno este proyecto y sus antecedentes.



2. IMPLEMENTACIÓN EN SOLIDWORKS

Durante este apartado se expondrá el proceso de implementación de cada una de las piezas en el software de diseño. Se discutirán las simplificaciones geométricas asumidas para su modelización durante el proceso, así como la principal geometría o cota que caracterice a la pieza y sus posibles dificultades de implementación.

Para una mejor comprensión y ligereza durante el desarrollo del documento, las descripciones de las figuras estarán disponibles al final del documento en el apartado 10.2.

2.1. ÁRBOL DE LEVAS

La Figura 1 muestra la implementación del árbol de levas del motor diésel real. La implementación de esta fue relativamente sencilla, pues las cotas que definen la pieza no tienen mayor complicación de tratamiento. No se tuvo que realizar ninguna simplificación. Esto puede apreciarse al comparar la Figura 1, con la imagen del árbol de levas real que puede verse en la Figura 2.

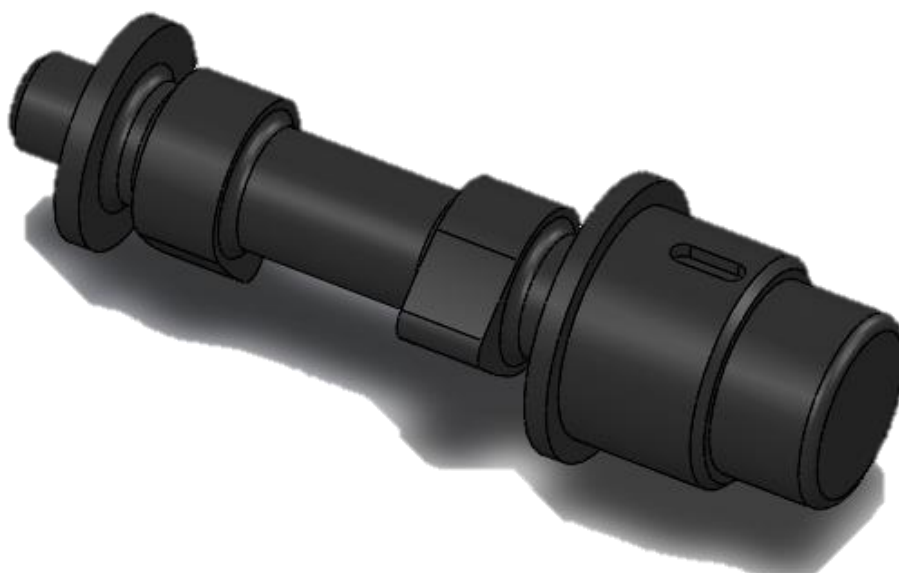


Figura 1.



Figura 2.

La principal característica de esta pieza es el desfase entre las levas. Este es de 93° .

2.2. ÁRBOL DE LEVAS MODIFICADO

La pieza correspondiente a la Figura 3 muestra la implementación del árbol de levas modificado. Esta pieza corresponde al conjunto del motor modificado y es la única pieza diferenciadora entre ambos conjuntos. Esta pieza no pudo ser medida durante el trabajo realizado en [2], puesto que estaba ensamblada dentro del motor modificado y resultaba del todo delicado desmontarlo, por diversas complicaciones que pudieran surgir a posteriori. Sin embargo, fue diseñada a partir del plano de fabricación de la pieza perteneciente a un trabajo previo [1]. Por lo tanto se asume que representa fielmente el real sin ningún tipo de simplificación.

La principal diferencia con respecto al árbol de levas real, es que las levas pasan a ser dobles, y el desfase se modifica de 93° a 90° .

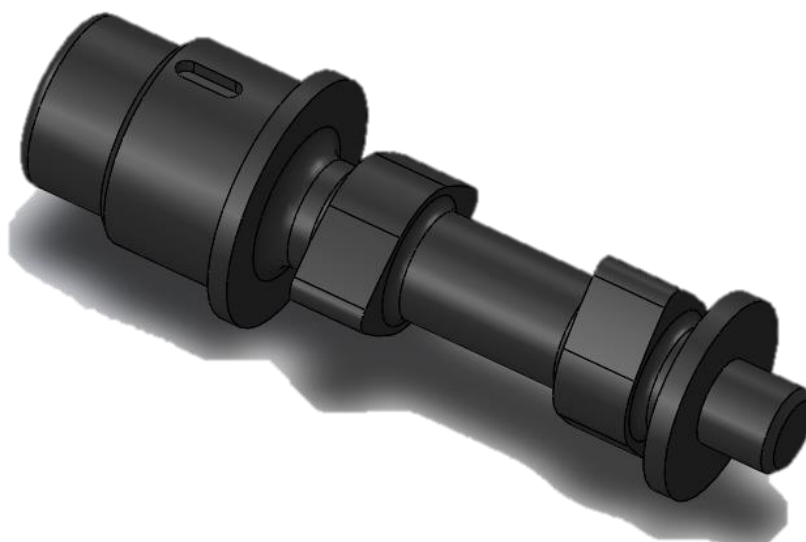


Figura 3.

2.3. BIELA

La principal simplificación que sufrió esta pieza, que puede observarse en la Figura 4, para su diseño fue en esencia la geometría asociada al vaciado de la parte estructural de la pieza. Debido a la complejidad para medir redondeos tan pequeños sobre una superficie irregular, como era el caso. Estas irregulares pueden observarse y compararse con el modelo 3D en la Figura 5, en la que se observa el elemento biela real. Y por lo tanto en consecuencia la geometría global de la parte estructural de la biela, no reproduce con la fidelidad de las piezas anteriores la realidad de la pieza física, sin embargo, no deja de ser una similitud aceptable, debido a que las cotas fundamentales que dotan a la pieza de sus características principales han permanecido inalteradas. Como son la distancia entre los centros de los cilindros o los diámetros de estos.

Cabe comentar, aunque se explicará de manera más precisa en el Apartado 2.13, las medidas de la cavidad para la chaveta son aproximadas y por lo tanto constituyen otra simplificación del diseño.



Figura 4.



Figura 5.



2.4. BULÓN

La sencillez de este elemento, representado en la Figura 6 no da lugar a ninguna simplificación, por lo que su reproducción trata de ser fidedigna de la real.

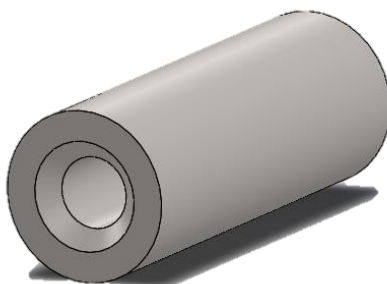


Figura 6.

2.5. CHAVETA ÁRBOL DE LEVAS

Como puede observarse la sencillez de este elemento, Figura 7, no dejó lugar a ninguna simplificación.

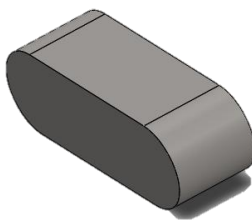


Figura 7.

2.6. CIGÜEÑAL

Este es el elemento implantado más controvertido debido a la importancia de las simplificaciones asumidas durante su implantación en SolidWorks.



Figura 8.

Como se puede observar en la Figura 8 a simple vista, los engranajes forman parte de la totalidad del sólido. Sin embargo en la realidad son piezas separadas, encajadas mecánicamente mediante un ajuste y una claveta para que la rotación durante los ciclos sea totalmente solidaria, como puede observarse en la imagen real del cigüeñal representado en la Figura 9. Esta simplificación, aunque respetando la geometría de los engranajes, se realizó debido a la dificultad que el compañero Iñigo Echeverría Amescua, tuvo durante su proyecto para desmontar los engranajes sin dañar los elementos [2].



Figura 9.



De esta forma, se decidió implantarlos formando parte de un conjunto de una sola pieza. Y aunque se respetaron las geometrías tanto de la pieza sólida como de los engranajes, no deja de ser una simplificación discutible e importante, en el momento de dotar al elemento de un determinado material se le otorga este mismo también a los engranajes, los cuales en la realidad no lo comparten. Y es en este aspecto donde la simplificación flaquea en mayor medida. No deja de ser sin embargo una simplificación aceptable, ya que el peso total de la pieza real junto con los engranajes no dista en gran medida del obtenido con el cálculo realizado por SolidWorks [2].

Este dato del peso es importante a la hora de cálculos inerciales y dinámicos posteriores, será un dato con gran influencia por lo que debe estar lo suficientemente ajustado a la realidad como para que los resultados que se obtengan no disten demasiado con lo observado en la experimentación.

Por último, y aunque es más irrelevante, se deben comentar los redondeos de los contrapesos, ya que no son fieles reproducciones de la realidad debido a las irregularidades de estos redondeos y la dificultad añadida para su medición debido a lo grotesco del acabado en estas partes de la pieza.

Con respecto a lo característico de la pieza, la geometría esencial, es en esencia la distancia entre los dos ejes, que ha de ser exacta a la de las especificaciones técnicas, porque es el dato que determinará la carrera que recorrerá el pistón durante el funcionamiento. Esta medición de datos ya ha sido explicado en un trabajo anterior [2], sin embargo se quería resaltar la importancia de esta geometría y recordar su valor: 32 mm, es decir 64 mm de carrera.

2.7. EJE DE CONTRAPESOS

Al igual que en el Apartado 2.6, este elemento también sufrió dos simplificaciones.

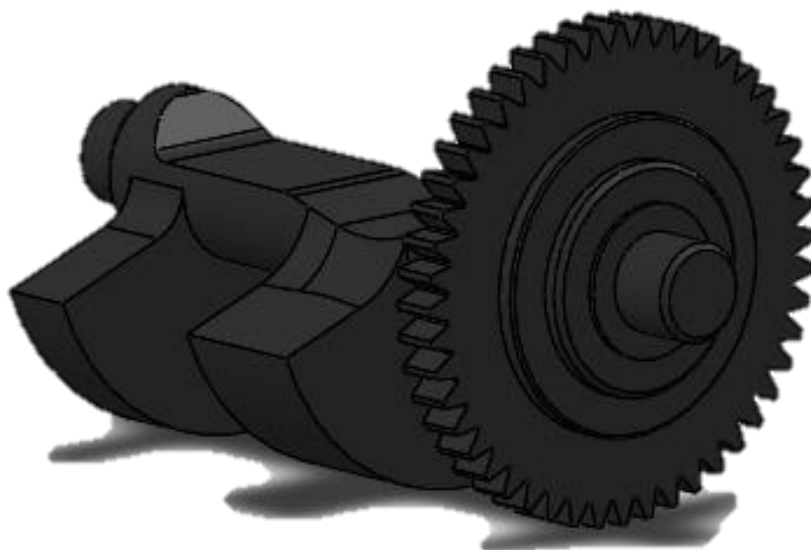


Figura 10.

Como puede observarse en la Figura 10, en esta ocasión el engranaje también forma parte de un conjunto sólido, debido a los mismos inconvenientes comentados en el apartado anterior. Esta simplificación implicará los mismos errores en futuros cálculos debido a que el material es el mismo tanto en sólido como en el engranaje solidario a él, lo que dista en cierta medida de la realidad.

Además se vuelven a encontrar las dificultades de los redondeos debido a la irregularidad de la pieza en estos contornos y a lo grotesco del acabado en ciertas partes de la pieza, característica que también podía observarse en el cigüeñal. Por lo que se ha intentado reproducir lo más fielmente a la realidad, en la medida de lo posible.

2.8. ENGRANAJE DEL ÁRBOL DE LEVAS

A diferencia de las dos piezas anteriores, gracias al trabajo realizado anteriormente [2], se obtuvieron, como ya se ha comentado en los Apartado 2.1 y 2.2, los planos de fabricación del árbol de levas y del engranaje, por lo que la implementación pudo darse por separado satisfactoriamente y de manera sencilla, sin ningún tipo de simplificación.

La figura 11 muestra la geometría del engranaje. La característica más importante de esta pieza es el número de dientes que son 72.

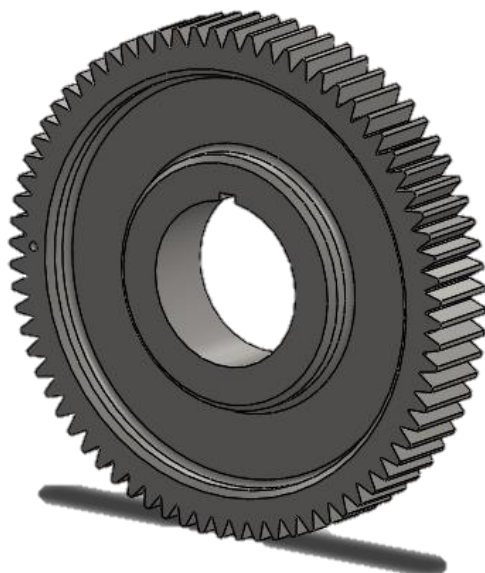


Figura 11.

2.9. PALPADOR

La sencillez de este elemento, Figura 12, no dio pie a ningún tipo de simplificación. La implementación fue rápida y fiel a la pieza real.



Figura 12.

2.10. PERNO DE UNIÓN BIELA-SOMBRERETE

Debido a la geometría básica y sencillez de diseño de esta pieza que puede observarse en la Figura 13, no se produjo ninguna simplificación durante la implantación, por lo que el resultado es fiel a la pieza real.



Figura 13.



2.11. PISTÓN

El pistón, que puede observar reflejado en las Figuras 14 y 15, se trata de la pieza fundamental del ensamblaje, por lo que durante el trabajo [1], este fue elemento con más tiempo de trabajo asociado, con el fin de conseguir todas las cotas y datos posibles para su perfecta implementación en SolidWorks. La imperfección de ciertos redondeos y acabados en el interior de la pieza, los cuales puede observarse en las imágenes reales del pistón representadas en las Figuras 16 y 17, complicaron la medición, sin embargo no se realizó ningún tipo de simplificación y por lo tanto su implementación en el modelo 3D es una reproducción fidedigna de la real.

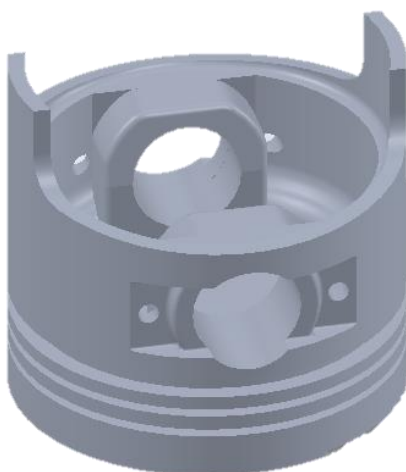


Figura 14.

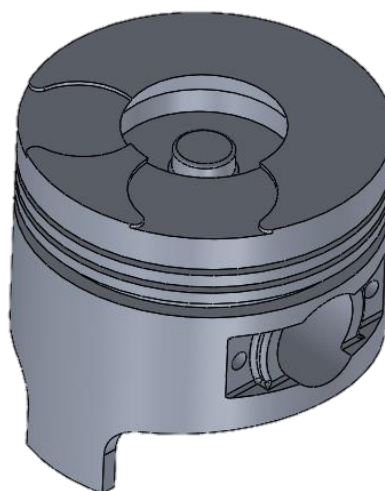


Figura 15.



Figura 16.



Figura 17.



2.12. SEGMENTOS

El pistón consta en su conjunto, de tres segmentos con diferentes fines cada uno de ellos. Sin embargo, debido a la complejidad geométrica del 3^{er} segmento (segmento de engrase), y a que no se tiene como objetivo simular la distribución del aceite a través de la cadena cinemática, este segmento no ha sido implementado en SolidWorks.

Con respecto a los otros dos segmentos, al tener una geometría casi idéntica, únicamente se ha implementado el 1^{er} segmento (segmento de fuego), e insertando posteriormente dos elementos iguales en el ensamblaje, que en apartados posteriores se estudiarán con detenimiento. Resumiendo, el 2^o segmento (segmento de compresión), se diseña, idéntico al 1^{er} segmento. Esta simplificación, aunque no es importante pero si destacable.

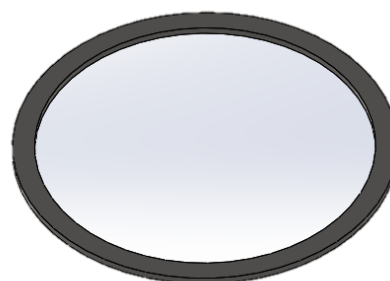


Figura 18.

Como se puede apreciar en la Figura 18, son cilindros totalmente cerrados, no así en la realidad, en la que disponen de un pequeño corte para que este pueda amoldarse por completo al espacio que existe entre el cilindro y el pistón. Sin embargo, esta característica impedía, como ya se explicará en el Apartado 6, establecer unas condiciones de contorno infinitesimales (o cercanas) que posibiliten el cálculo de datos. Por lo tanto lo que se realizó fue rebajar 0,1 mm el diámetro exterior, y se creó una pieza auxiliar cilíndrica que taponará ese agujero para poder tener dicha salida infinitesimal.

2.13. SEMICOJINETE

La Figura 19 representa la pieza denominada semicojinete la cual resultó de fácil implementación, sin embargo, este si ha sufrido una pequeña simplificación con cierta importancia.

La chavetera saliente, con el que realiza un mejor ajuste con la biela, era muy difícil de medir, como se puede observar en la Figura 20 que representa el semicojinete real, por lo que las cotas de esta parte son aproximadas y por lo tanto no reproducen fielmente la realidad que se pudiera observar. Sin embargo, la función que debe desempeñar (apriete), se realiza perfectamente, restándole importancia a la hipótesis geométrica simplificativa asumida en el diseño.

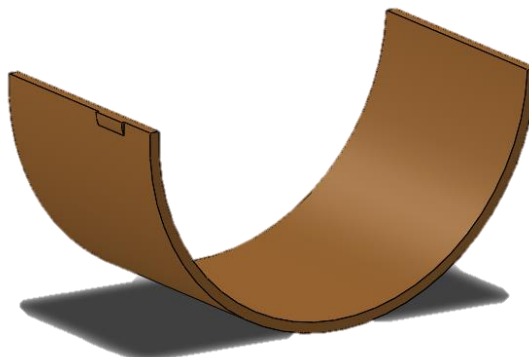


Figura 19.



Figura 20.

2.14. SOMBRERETE

La Figura 21 muestra el sombrerete de la biela. Esta pieza contiene una complejidad similar a la de la biela y las simplificaciones son idénticas a las realizadas en esta última. Además también se le realizó la simplificación mencionada en el Apartado 2.13 y las medidas del chavetero son aproximadas.

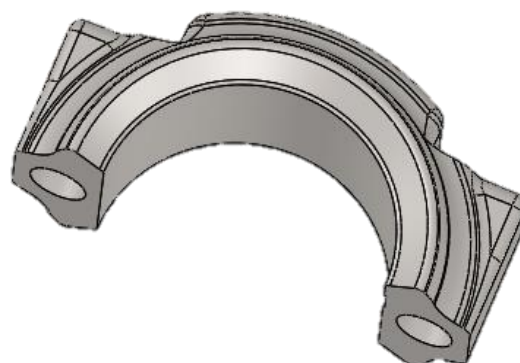


Figura 21.



2.15. TOPE DE LAS VÁLVULAS

La pieza que se observa en la Figura 22, tiene una geometría sencillísima de implementar por lo que su reproducción es fiel reproducción de la realidad.

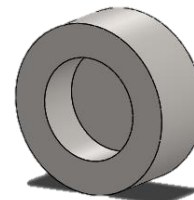


Figura 22.

2.16. VÁLVULAS DE ADMISIÓN Y ESCAPE

En este caso, aunque las geometrías de estos elementos (muy parecidas a las del palpador) sean muy sencillas de implementar, se hizo una simplificación en la parte inferior de los elementos.

Esta pieza, consta de un pequeño chaflán, como puede observarse en la Figura 25 que representa la válvula de admisión real, que no pudo realizarse en el diseño 3D, que puede observarse en las Figuras 23 y 24, debido a que supondría una escasa rebaja de la cota funcional del diámetro, con lo que la estanqueidad que deben ofrecer las válvulas durante su funcionamiento ya no sería tal, además de dar por verdadera una cota esencial que es ciertamente falsa. De esta forma, se prescindió por tanto del chaflán, que en esencia no es una característica fundamental de los elementos y es una simplificación asumible sin que se produzcan errores graves.



Figura 23.



Figura 24.



Figura 25.



2.17. CILINDRO

Aunque este elemento no sea en sí parte del tren de transmisión, ni un elemento real como tal, es necesario para poder realizar la correcta simulación y ensamblajes.

En primera instancia, los ensamblajes necesitarán de un elemento fijo de referencia sobre el que distribuir el resto de elementos de la cadena cinemática.

En segundo lugar, esta pieza resulta imprescindible para poder construir asociado a ella los conductos de admisión y escape necesarios para poder llevar a cabo una correcta simulación de entrada y salida de los fluidos con respecto al cilindro. Por último, se necesitará la geometría de este elemento para crear para simular el ciclo termodinámico.

Con respecto a la cavidad de admisión, que puede observarse en la Figura 26, cabe destacar una simplificación. Esta se hizo a la entrada del conducto. Esta entrada no es totalmente cuadrada, aunque los lados superior e inferior distan en cota tan solo 1mm. Sin embargo es una entrada trapezoidal, como se observa en la Figura 27. Este diseño no pudo implementarse debido a que la geometría del conducto también era muy complicada de diseñar (ángulos cerrados, pendientes, geometrías variables, etc...) y ambas a la vez no tenían la posibilidad de crearse.

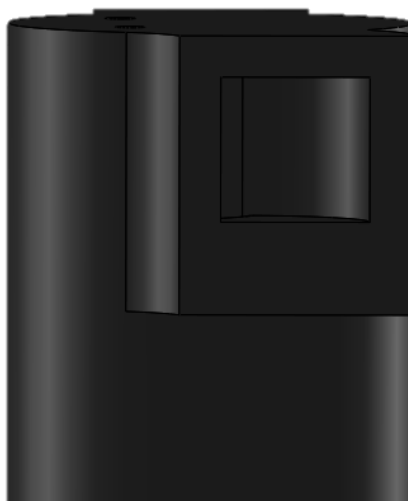


Figura 26.

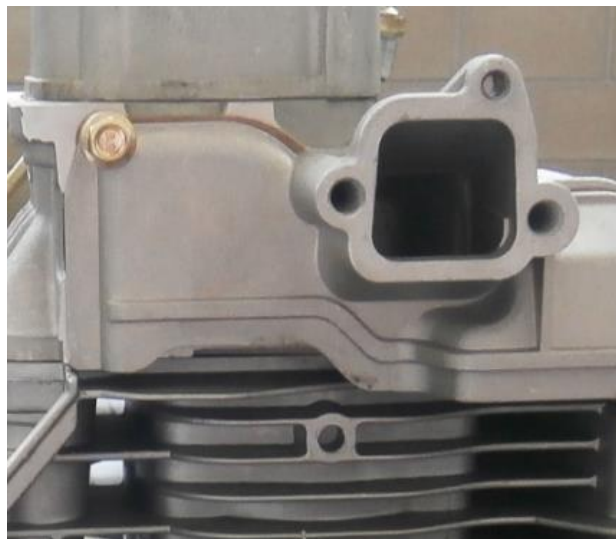


Figura 27.

Se necesita la Figura 28 para observar las geometrías interiores de los conductos, además de las vistas habituales (opciones que ofrece el software). Estas geometrías puede compararse con la visualizando la Figura 29.



Figura 28.

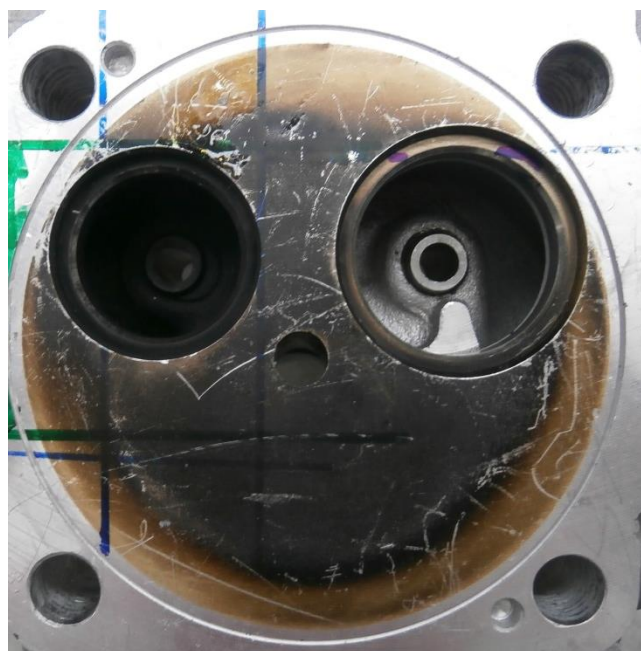


Figura 29.

2.18. PIEZAS NORMALIZADAS

Los rodamientos descritos en el proyecto [2], han sido sustraídos de la biblioteca de piezas normalizadas que posee el programa SolidWorks y forman parte de ambas cadenas cinemáticas real y modificada.

Sin embargo al haber sido incorporados durante el ensamblaje, únicamente serán visibles junto con el resto de piezas en conjunto, es decir no existen como piezas individuales y de esta forma no existen imágenes únicas de ellas.

Por último, cabe destacar, que al ser piezas prediseñadas se presuponen fieles a los elementos reales y por lo tanto sin ninguna simplificación a discutir.



3. ENSAMBLAJES DE LAS CADENAS CINEMÁTICAS DEL MOTOR DIÉSEL REAL Y DEL MOTOR MODIFICADO

Como ya se ha mencionado en el apartado anterior, la única diferencia entre ambas cadenas cinemáticas es el elemento árbol de levas. Por lo tanto el desarrollo y la discusión de la metodología y los procedimientos que se han llevado a cabo para la formulación del ensamblaje serán idénticos en ambos casos, hasta la incorporación del árbol de levas, que en cada caso se utilizará el que corresponda.

El primer paso, fue ensamblar la biela con el sombrerete, mediante dos pernos de unión. Además, se incorporó a este primer conjunto el bulón, para posteriormente, poder establecer la unión con el pistón.

Por último para completar esta primera configuración se incorporaron los dos semicojinetes en el interior del cilindro que estará ensamblado directamente con el cigüeñal. De esta manera se puede observar en la Figura 30 esta primera configuración descrita.



Figura 30.



La Figura 31 representa el segundo ensamblaje que es la unión de la Figura 30 al pistón. Este se incorporó concéntricamente al bulón. A la par de esta incorporación, también se añadió el cigüeñal también con relación de concentricidad pero respecto de los semicojinetes alojados en el interior del conjunto de la biela.



Figura 31.

Para continuar con la configuración se hacía necesaria ya, la incorporación de un elemento fijo, es decir, de una referencia. Anteriormente se ha citado que esta función la lleva a cabo el elemento denominado como cilindro. Este se relacionó con el pistón también por concentricidad entre la cara interior del cilindro y la exterior del pistón, como se puede observar claramente en la Figura 32. Además, en esta secuencia también se incorporaron sendos segmentos (segmento de fuego y segmento de compresión) en el pistón, los cuales quedan perfectamente tangentes a la pared interior del pistón (simulando la función de estanqueidad). Es por ello, que se le ha dotado al elemento cilindro de cierta transparencia, para poder observar con mayor detalle la disposición de los distintos elementos.



Figura 32.

En el cuarto paso de este proceso, se incorporó el eje de contrapesos. Las Figuras 33 y 34 muestran un esquema asociado al elemento cilindro (constituye el elemento de referencia de la configuración) en el que se dispusieran las medidas en vertical y horizontal, entre los tres ejes (cigüeñal, eje de contrapesos y árbol de levas) para poder configurar las relaciones asociadas entre los diferentes elementos.



En este paso, también se introdujo la relación mecánica de engranaje entre las geometrías de engranaje del contrapeso y del cigüeñal. Esta relación se estableció con el número de dientes de ambas geometrías (48 en ambos casos), por lo que el giro relativo entre ambas componentes es de uno a uno, en sentidos de giro contrarios. Además de esto, ambos elementos engranaron dispuestos de igual forma que en el tren de engranajes real, como puede describirse en el trabajo anterior [2].

En este último paso, se incorpora el árbol de levas, desarrollándose dos configuraciones distintas. En primer lugar, se expondrá la configuración del motor diésel real y a continuación la del motor modificado. De esta forma, se podrá analizar claramente las diferencias entre ambas.



3.1. DESARROLLO DE LA CADENA CINEMÁTICA DEL MOTOR DIÉSEL REAL

A continuación se incorporará el árbol de levas al conjunto, Figura 35. Este se incorpora de igual manera que el eje de contrapesos, atendiendo al croquis de posiciones asociado al cilindro. De igual forma, se establecerá la relación de engranaje entre el engranaje del árbol de levas y la segunda geometría de engrane del cigüeñal, tal y como están dispuestos en la cadena cinemática real. En este caso la relación de dientes entre ambos es de 2 a 1, por lo que por cada vuelta del árbol de levas el cigüeñal dará dos (configuración típica de un motor de combustión interna alternativa de cuatro tiempos).



Figura 35.



Posteriormente, se atenderá a las marcas realizadas tanto en el engranaje del árbol de levas como en la geometría del cigüeñal (simulando las reales que pueden observarse en la Figura 37, con cierta aproximación), para terminar con la correcta disposición de los elementos en la configuración (Figura 36).

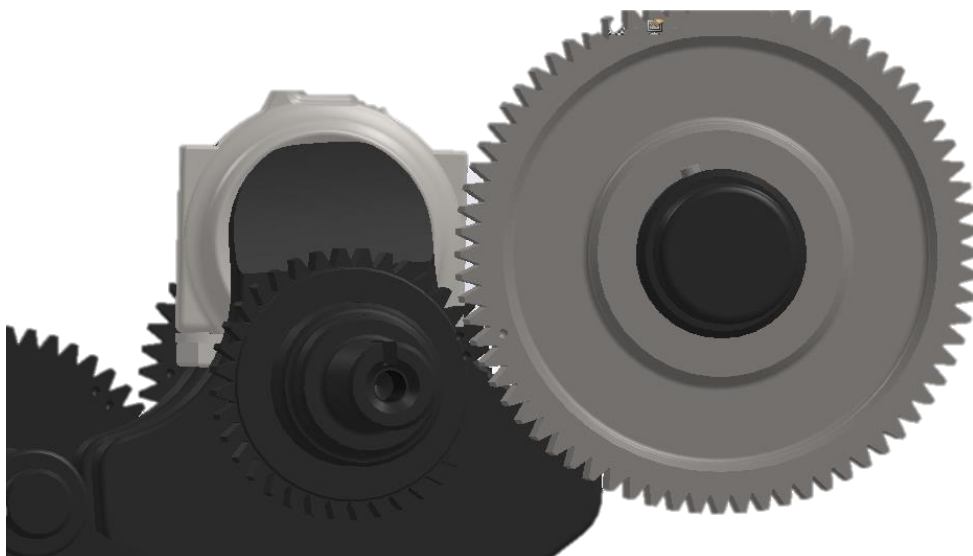


Figura 36.

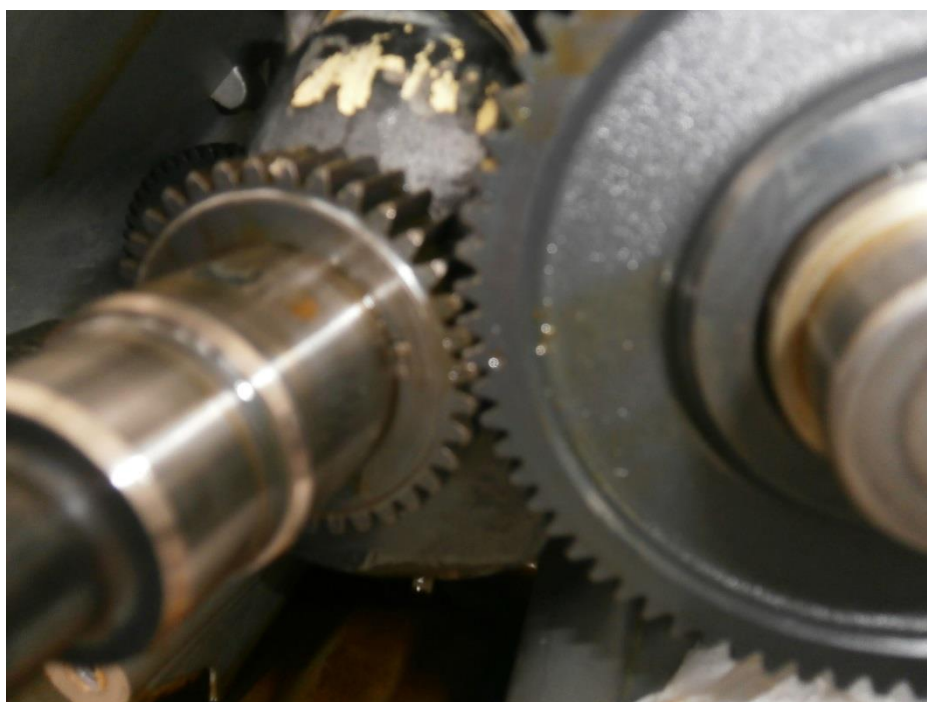


Figura 37.



Simulación y estudio en Solid Works de la cadena cinemática de un motor diésel mono-cilíndrico y de ese mismo motor modificado.

19 de Junio del 2015

Por último se ocultará el croquis de posiciones para que no entorpezca el desarrollo de la configuración.

En las Figuras 38 y 39, se incorporan los palpadores sobre las levas, con la relación mecánica de leva entre el contorno superficial de las geometrías del árbol de levas y los palpadores. Además se introducirán las válvulas en los orificios dispuestos para ellas en el cilindro.

En este momento de las configuraciones (común a ambas) se produce la simplificación más importante del desarrollo del proyecto. Esta gran complejidad es la implementación en 3D de las relaciones que se producen entre la cadena de transmisión de movimiento compuesta por: palpador-varilla-balancín-válvula, ya que al no poseer los conductos en los que estas piezas se disponen dentro del bloque motor para tener una referencia fija.

Esta problemática permitió concluir que una interacción lineal, simulada entre los palpadores y las válvulas produciría el mismo resultado que constituir todo el tren de transmisión antes citado.

Con esta hipótesis, se estableció una relación lineal entre ambos elementos mediante el seno del ángulo de inclinación de las varillas en su disposición real en el motor diésel (20° , dato extraído del proyecto [2]). De esta forma por cada milímetro que el palpador ascendiera por efecto del movimiento de la leva, la válvula en cuestión bajaría un milímetro multiplicado por el seno de 20° .

Para acabar esta primera configuración únicamente falta la adición de los anteriormente mencionados cojinetes normalizados en sus correspondientes disposiciones.

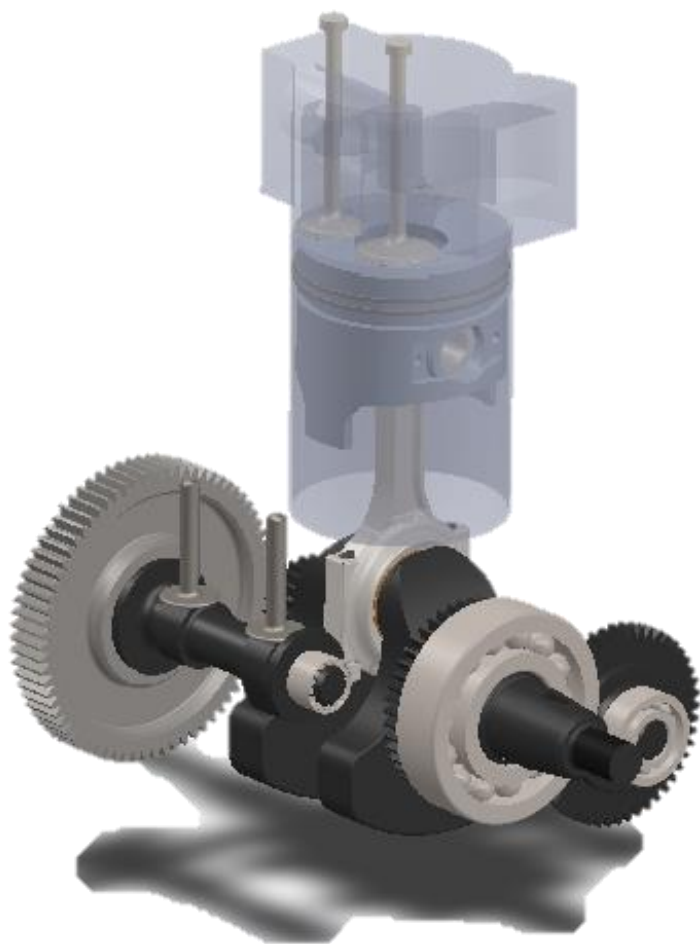


Figura 38.



Figura 39.



3.2. CONFIGURACIÓN DE LA CADENA CINEMÁTICA DEL MOTOR MODIFICADO

El único cambio de las configuraciones es el elemento árbol de levas anteriormente citado, el resto de problemas y simplificaciones fue común en ambas disposiciones, por lo que se mostrarán a continuación en las Figuras 40 y 41, únicamente las imágenes de la configuración final, pues carece de sentido repetir el idéntico desarrollo, duplicando la documentación ya desarrollada.



Figura 40.

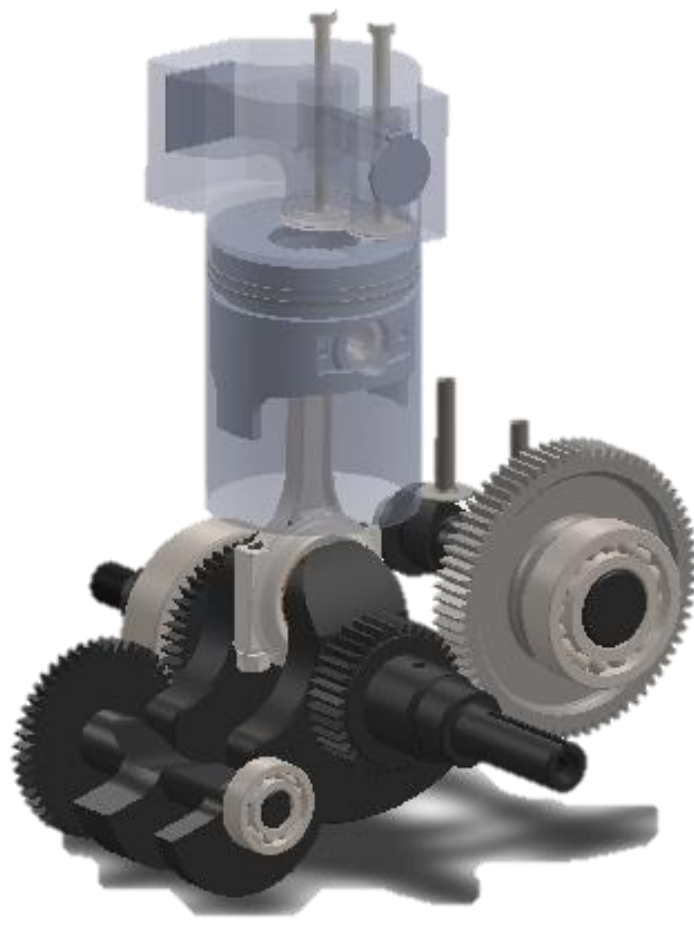


Figura 41.



4. ANALISIS DE MOVIMIENTO DE LA CADENA CINEMÁTICA DEL MOTOR DIÉSEL REAL

Este estudio se basa en un motor de combustión interna alternativa diésel de cuatro tiempos, en este estudio de movimiento se analizarán las cuatro etapas del ciclo termodinámico que lo componen y se relacionarán con las posiciones de los distintos elementos, identificando las características principales de cada uno para nuestra configuración.

Además, se identificará estas características con su comportamiento en un ciclo termodinámico típico, comprobando sus similitudes y sus diferencias.

Con el fin de lograr un mejor seguimiento del análisis, a la hora de enfocar una imagen para realizar un zoom de las válvulas, para identificar con mayor precisión el movimiento que se está describiendo en cada momento, estas siempre se colocarán en la misma posición, es decir, la válvula de admisión a la izquierda y la de escape a la derecha.

Con los palpadores ocurrirá lo mismo que con las válvulas, el palpador asociado a la válvula de admisión se observará siempre a la izquierda de la imagen (en los zoom) y el palpador asociado a la válvula de escape se encontrará en la derecha.

4.1. ADMISIÓN

La válvula de admisión, que se muestra en las Figuras 42 y 43 (ampliado), comienza su apertura antes de que el pistón alcance el punto muerto superior (PMS), durante la carrera de escape. Este movimiento es el denominado como avance a la apertura de admisión.



Figura 42.

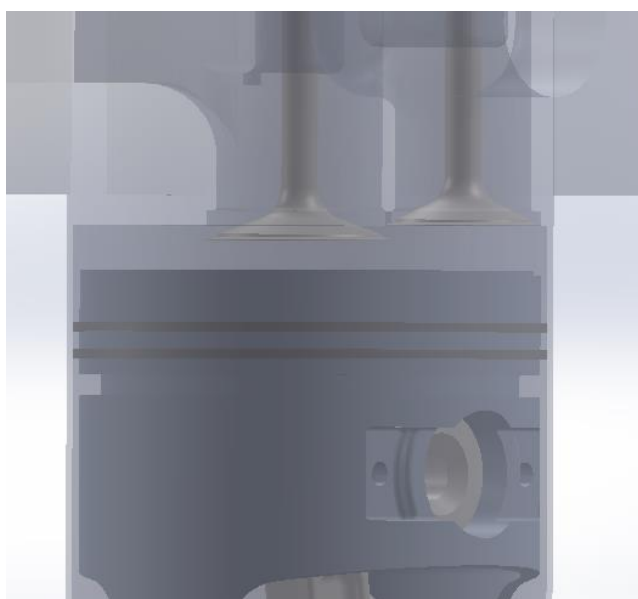


Figura 43.



Este avance, puede observarse en el movimiento de las levas. Se muestra en la Figura 44, como la leva comienza a empujar al palpador.

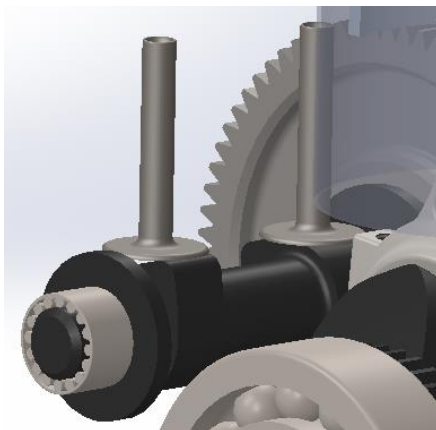


Figura 44.

La fase de admisión en un motor de combustión interna alternativo diésel de cuatro tiempos normalmente también posee lo que se denomina el retraso al cierre de admisión, es decir, la válvula de admisión permanece abierta durante el recorrido desde el PMS hasta el punto muerto inferior (PMI), (lo que se denomina como expansión del aire) y una vez alcanzado el PMI, es decir durante la fase de compresión del aire.

Sin embargo en este motor (SD60 de Genenergy), este retraso al cierre de admisión no se produce, porque la válvula de admisión se cierra antes de llegar al PMI, como se puede observar en las Figuras 45 y 46 (ampliado).





Figura 45.



Figura 46.

Nuevamente, si se observa la posición de las levas, se ve que ninguna de las dos se encontrará empujando a su palpador correspondiente (Figura 47).

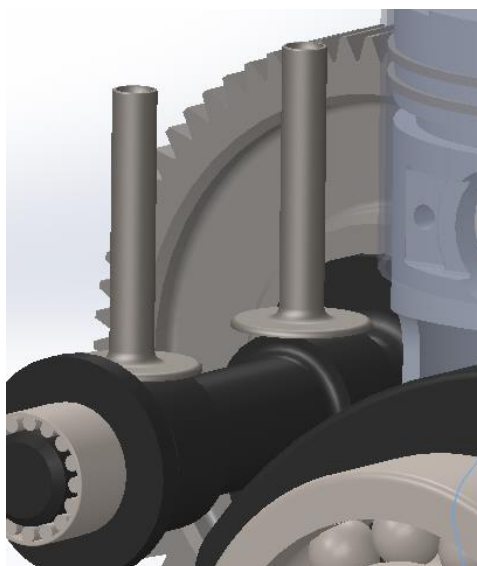


Figura 47.



4.2. COMPRESIÓN

Durante esta fase ambas válvulas permanecen cerradas y el aire se comprime desde el PMI hasta el PMS. Esta fase puede contemplarse en su totalidad en las dos Figuras 48 y 49.



Figura 48.

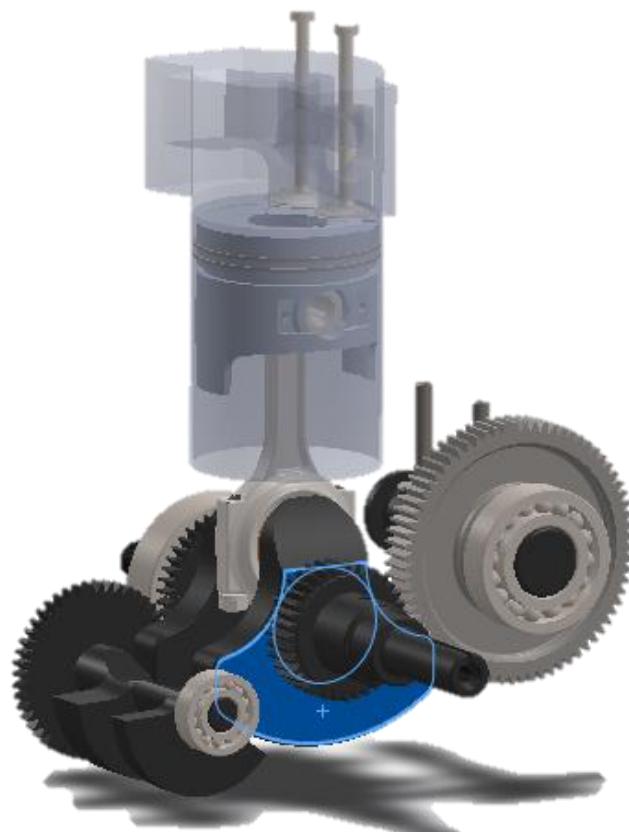


Figura 49.

4.3. COMBUSTIÓN/EXPANSIÓN

El principal problema para visualizar esta etapa del ciclo es el hecho de que no está simulado el inyector por lo que no se puede visualizar el momento exacto en el que inyectaría combustible en el cilindro. Por lo que esta etapa se muestra igual que la fase de admisión-expansión, como puede observarse en la Figura 50, con la diferencia de que ambas válvulas permanecen cerradas.



Figura 50.

4.4. ESCAPE

Al igual que en la fase de admisión, en la fase de escape, también se produce lo denominado como avance a la apertura de escape. La válvula deberá comenzar a abrirse antes de que el pistón llegue al PMI, durante la carrera de expansión. Esto puede visualizarse en las Figuras 51 y 52 (ampliado).

Este adelanto se produce debido a que el trabajo que realiza el pistón en la carrera de escape para empujar a los gases de escape es relativamente grande al ser la presión en el cilindro mayor que la atmosférica de no abrirse la válvula de escape antes del PMI. Cuando el pistón comenzase la carrera de escape después de pasar el PMI, la presión será del orden de la atmosférica por lo que el trabajo que realizará el pistón durante la carrera de escape será bastante menor.

Esta circunstancia puede observarse en la siguiente figura de la configuración.

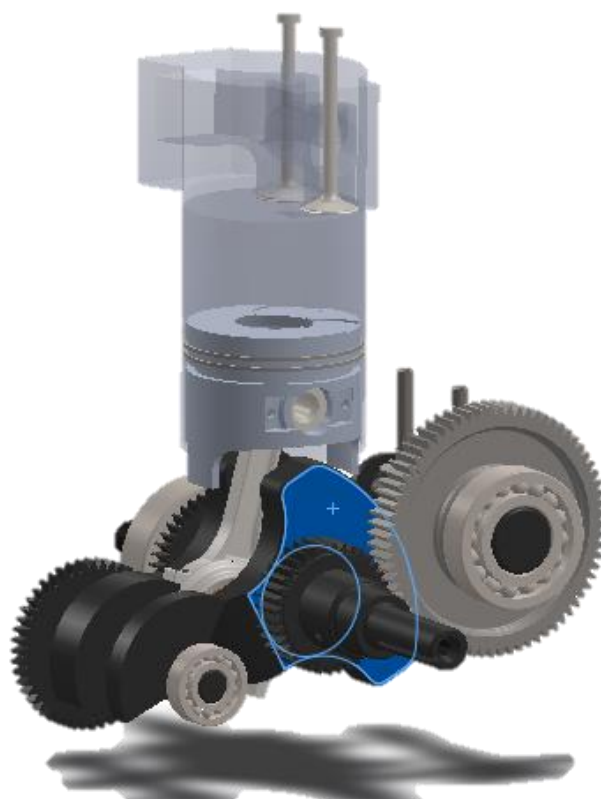


Figura 51.



Figura 52.



En la Figura 53, puede observarse como la leva de escape empuja a su palapador. Esta figura permite comprobar mejor la posición de las levas.

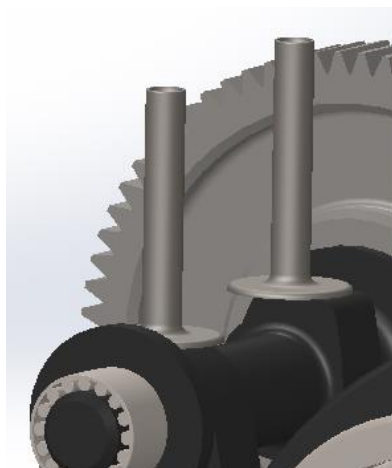


Figura 53.

Otro fenómeno que suele darse en los motores de combustión interna alternativos diésel de cuatro tiempos es el retraso al cierre del escape. La válvula de escape se cierra pasado el PMS para ayudar a entrar a los gases frescos durante el comienzo de la fase de admisión. Sin embargo en este motor (SD60 de Genergy) esta situación no se da. Por lo tanto, en las Figuras 54 y 55 (ampliado), se va a observar como el cruce de válvulas se da antes de llegar el pistón al PMS.

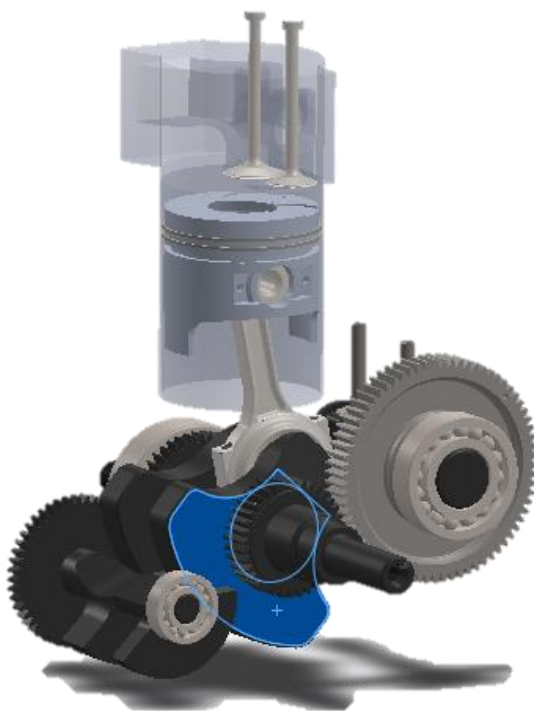




Figura 54.



Figura 55.

En las levas se observa como ambas están empujando a sus respectivos palpadores, como puede verse en la Figura 56.

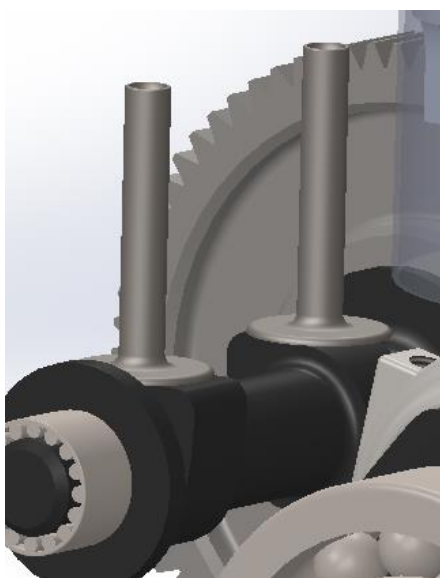


Figura 56.



5. ANALISIS DE MOVIMIENTO DE LA CADENA CINEMÁTICA DEL MOTOR MODIFICADO

El motor modificado, fue tal para convertir el motor diésel de cuatro tiempos, en uno de dos tiempos que funcionase con aire a presión, como ya se ha comentado con anterioridad. Bajo esta premisa, se analizará el movimiento de la configuración, sus etapas, sus posiciones e identificando las características principales de cada posición para esta configuración.

Como a continuación se describirá, la principal diferencia es que no se utiliza combustible para realizar el ciclo, sino que el aire entra ya a una determinada presión, lo suficientemente alta como para completar el ciclo por sí mismo despresurizándose en el cilindro.

Además como ya se ha mostrado antes, el árbol de levas modificado, posee levas dobles lo que significa que por cada vuelta de cigüeñal se completará un ciclo termodinámico completo.

5.1. ADMISIÓN-EXPANSIÓN

Al entrar el fluido ya presurizado, las fases de admisión y expansión se dan de manera simultánea, es decir conforme el fluido entra en la cilindro, este se despresuriza en pos de empujar al pistón en su carrera del PMS al PMI.

Al igual que en el ciclo de cuatro tiempos, puede observarse el avance a la apertura de admisión justo antes de que el pistón llegue al punto muerto superior en las Figuras 57 y 58 (ampliado).

Se debe añadir que al ser el desfase entre las levas de 90° en vez de 93° el cierre de la válvula de admisión se produce antes que en el motor real, reduciendo el tiempo de admisión.

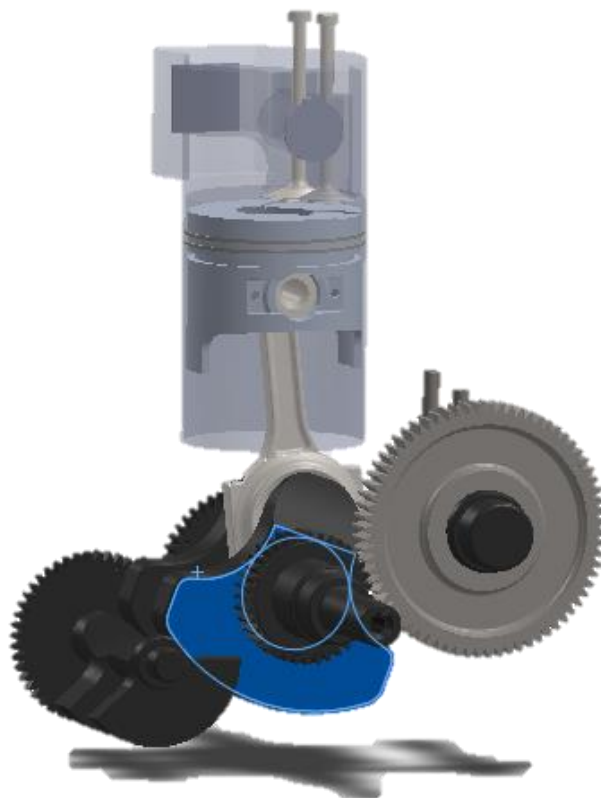


Figura 57.

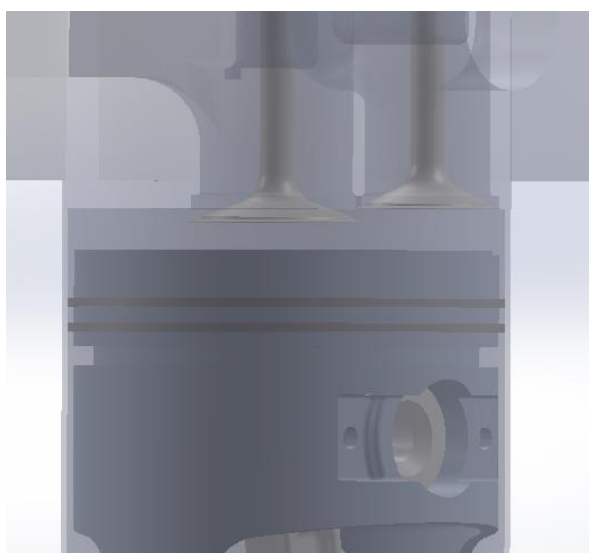


Figura 58.

Este avance, también puede observarse en el movimiento de las levas. Se observa en la Figura 59, como la leva comienza a empujar al palpador.

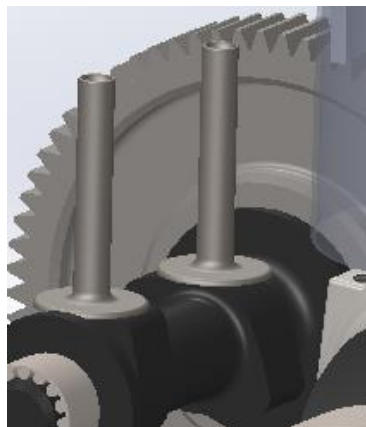


Figura 59.

Por último comentar, que también se darán dos cruces de válvulas, una al comienzo de la fase de admisión, con la finalización de la fase de escape, que luego se describirá, y otra hacia el final con el comienzo de la fase de escape, que se muestra en las Figuras 60 y 61 (ampliado), debido al avance a la apertura de escape en la fase de admisión; se dan dos cruces de válvulas por cada ciclo termodinámico.



Figura 60.



Figura 61.

En las levas se observa como ambas están empujando a sus respectivos palpadores, como puede verse en la Figura 62.

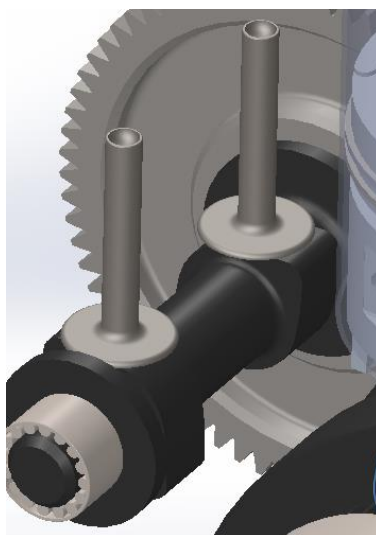


Figura 62.

5.2. ESCAPE

Al igual que en el ciclo de cuatro tiempos, en la fase de escape de esta configuración también se puede apreciar el avance a la apertura de escape (lo que provoca el cruce de válvulas al final de la fase de admisión) hacia el final de la fase de admisión.



Sin embargo antes se ha mencionado otro cruce de válvulas que sucede al final de la fase de escape antes de que el pistón llegue al PMS, debido al avance a la apertura y válvula de admisión, respectivamente. Esta situación puede observarse en las Figuras 63 y 64 (ampliado).



Figura 63.



Figura 64.



En las levas se observa como ambas están empujando a sus respectivos palpadores, como puede verse en la Figura 65.

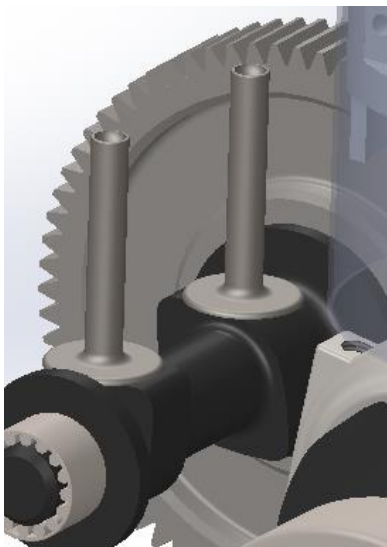


Figura 65.



6. SIMULACIÓN DE FLUJOS EN LA CONFIGURACIÓN DEL MOTOR MODIFICADO

Antes de comentar cada una de las simulaciones realizadas, es necesario comentar las condiciones ambientales establecidas, comunes a todas las simulaciones, porque representan el estado ambiental en el que se encontraba el motor modificado en el momento de la toma de datos para el Proyecto de Raquel Munuera Lario [1].

Lo primero a mencionar que el sistema de unidades escogido, es el Sistema Internacional (SI). También, se activó el efecto de la gravedad ($-9,81 \frac{m}{s^2}$ en el eje de referencia z) para la simulación, pues el software ofrece la posibilidad de realizar ensayos de fluidos bajo condiciones de gravedad cero, o incluso con distintas gravedades.

Posteriormente, se escogió aire como fluido de trabajo, y las condiciones ambientales fueron determinadas bajo los siguientes parámetros:

- **Presión atmosférica:** 1 [atm] = 101325 [Pa]
- **Temperatura atmosférica:** 298 [K] = 25°C

Por último y debido a dos razones, se considerarán las paredes adiabáticas. En primer lugar porque el flujo de calor a través de las paredes del cilindro no es objeto de estudio en este ensayo. Y en segundo lugar, porque aunque este no fuera objeto de estudio, si sería un parámetro determinante (temperatura en el interior del cilindro y la disipación del calor a través de las paredes de este y del pistón) si se alcanzaran temperaturas importantes en el interior del cilindro, como en el caso de un motor de combustión interna alternativo real. Pero al no ser este el caso, se tomará como válida la aproximación de tomar las paredes como adiabáticas.

A petición del profesor, José Carlos Urroz Unzueta, codirector de este proyecto, se realizarán los ensayos con los datos obtenidos del proyecto [1].

<i>P manométrica [bar]</i>	<i>P absoluta [bar]</i>	<i>RPM</i>	<i>Flujo másico [kg/s]</i>	<i>Densidad [kg/m³]</i>
2	3	1069	0,0191	3,5097

Tabla 1.

Las simulaciones que el software es capaz de realizar son en régimen estacionario, es decir son imágenes de momentos puntuales del ciclo. Esto es debido, a que los estudios de movimiento y los estudios de fluido no comparten módulo, porque no pueden estudiarse simultáneamente. Si bien, el programa en los últimos años ha progresado mucho en cuanto a esta materia, existe cierta incertidumbre en los resultados de las simulaciones.



En cualquiera de los casos, el objetivo será obtener datos y compararlos con los obtenidos en los ensayos experimentales para ver la correlación que pudieran tener las simulaciones a la realidad.

6.1. SIMULACIÓN DE ADMISIÓN

La simulación de la admisión, como en todas las restantes necesitará de una entrada y una salida. El software así lo requiere. Es por esto, lo explicado en el apartado 2.12, que se precisa de una salida infinitesimal para que actúe como salida en esta simulación y se puede obtener datos aproximados a la realidad. La comparación con la realidad podrá llegar a ser: *“que los segmentos no son estancos del todo y tienen cierta fuga de fluido por las paredes del cilindro”* [3]. Esta salida, será una salida atmosférica, con las condiciones iniciales comentadas previamente.

Por otro lado, la entrada de aire estará determinada por los 3 bares de presión absoluta del fluido a la entrada, como se observa en la Tabla 1 y el flujo másico de 0,0191 kg/s.

La figura 66 muestra el volumen de control a partir de lo anteriormente citado y previo a que el programa realice los cálculos.

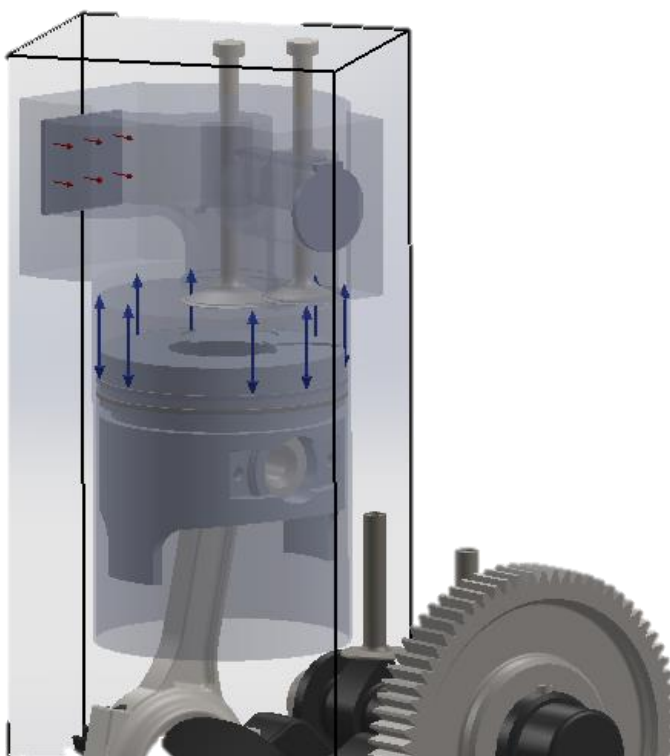


Figura 66.



Una vez se han repasado todos los parámetros, puede comenzar el proceso de simulación, con las condiciones de mallado y partición de celdas que el software ajusta a nuestro volumen de control.

Al finalizar, el programa presenta una serie de esferas que siguen unos determinados flujos que representan el movimiento del fluido en ese instante determinado. Esto puede verse representado en la Figura 67. Los colores representan diferentes presiones en la escala presentada contigua a la imagen tomada de la simulación.

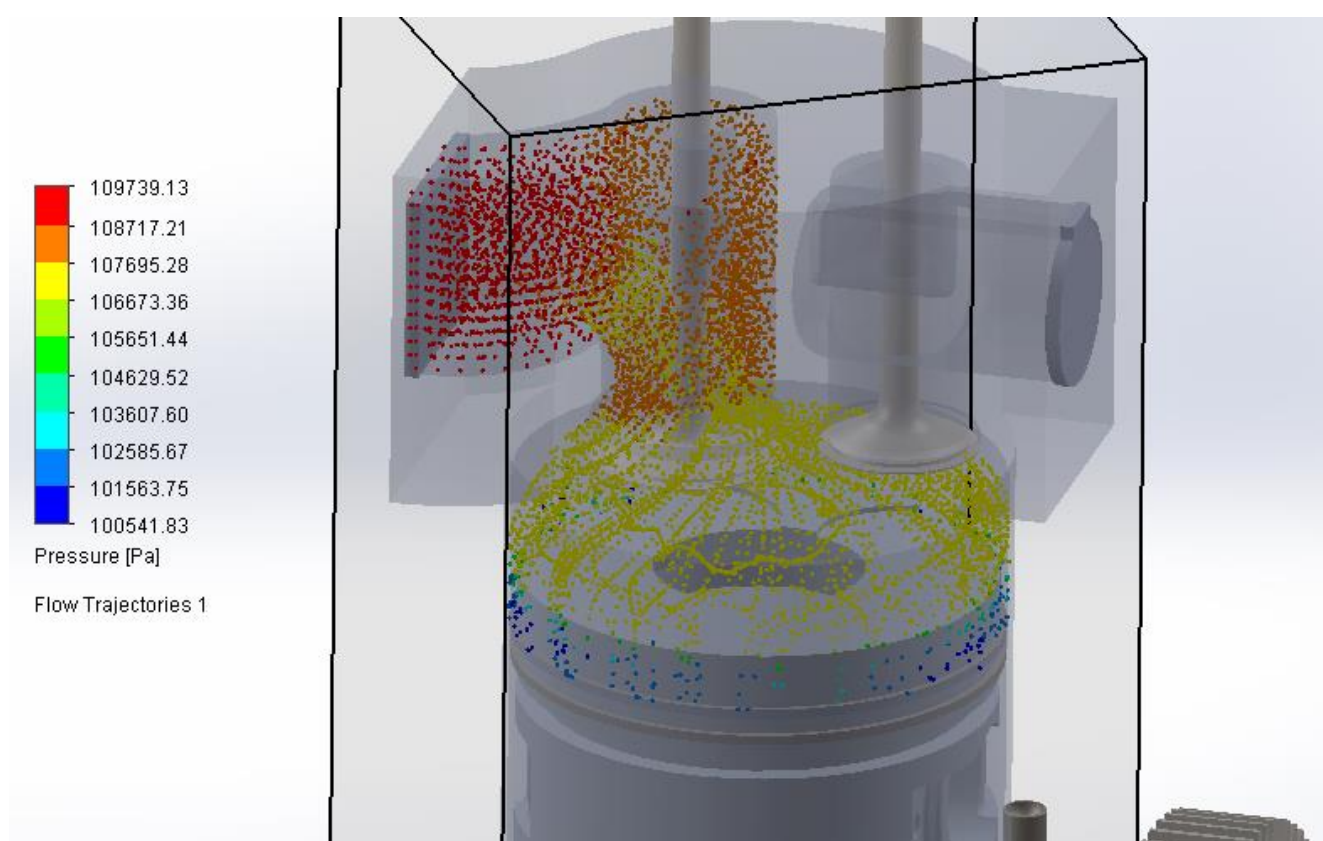


Figura 67.

Como se puede observar, pueden apreciarse las fugas de fluido por las paredes del cilindro, que toma a la salida la presión atmosférica indicada con tonos azules.

A la entrada, el fluido (color rojo) presenta las mayores presiones, como se esperaba, pero se despresuriza inmediatamente de 3 a 1,1 bar. La despresurización del fluido es constante ya que se observa que pasa gradualmente por toda la gama de presiones entre 1,1 y 1 bar de presión (y por toda la gama de colores que los representa).



Si bien esta despresurización instantánea que sufre el fluido a la entrada del conducto de admisión ya es dudosamente fiable, lo que verdaderamente desestima este ensayo como válido son los resultados obtenidos al colocar un sensor sobre la superficie del cilindro (virtualmente) para calcular la fuerza y otro colocado en el volumen de flujo para calcular la densidad de dicho fluido.

La discusión de los resultados se realizará en el Apartado 7. Las Figuras 68 y 69 representan la fuerza y la densidad frente al número de iteraciones realizadas por el programa hasta que estos dos parámetros convergen hacia una solución, respectivamente.

- Para la fuerza sobre la superficie del cilindro:

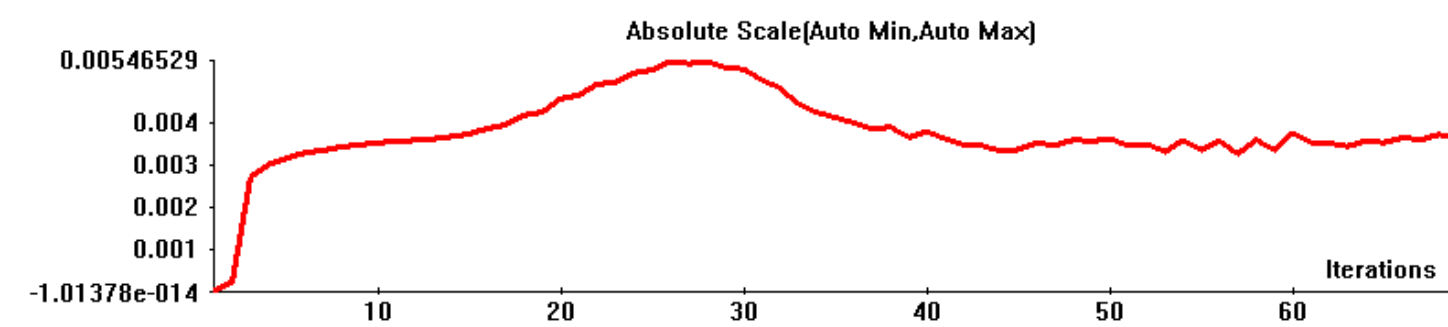


Figura 68.

Dato de convergencia: **0,0036 N**

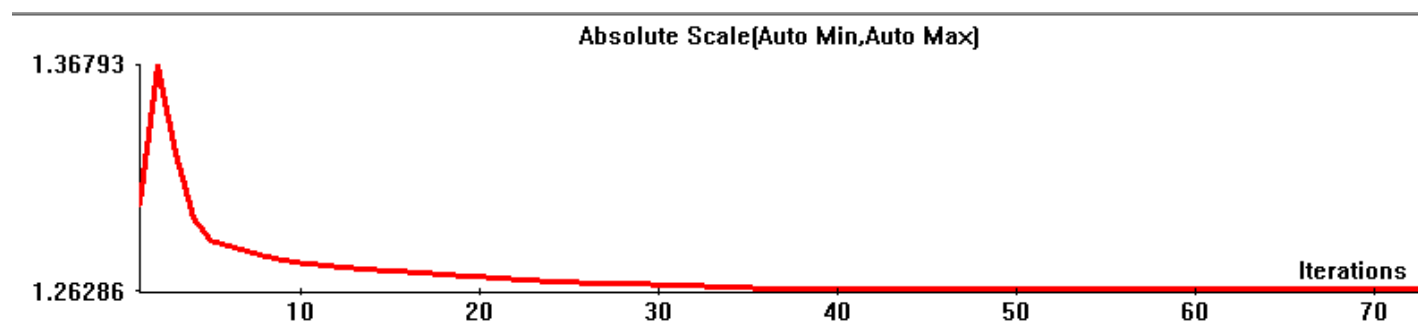


Figura 69.

Dato de convergencia: **1,2634 Kg/m^3**



6.2. SIMULACIÓN DEL CRUCE DE VÁLVULAS

En esta ocasión, no hace falta simular ninguna salida del fluido infinitesimal, puesto que al encontrarse ambas válvulas abiertas es el conducto de salida el que actuará de salida ambiental. La entrada mantendrá las condiciones de admisión antes citadas. El volumen de control correspondiente a este ensayo puede verse representado en la Figura 70.



Figura 70.

Al igual que en la anterior simulación, una vez se hayan repasado todos los parámetros, puede comenzar el proceso de simulación, con las condiciones de mallado y partición de celdas que el software ajusta a nuestro volumen de control.



Al finalizar, como en la simulación previa, el programa presenta una serie de esferas que siguen unos determinados flujos que representan el movimiento del fluido en ese instante determinado. Los colores representan diferentes presiones en la escala contigua a la imagen tomada de la simulación, como puede apreciarse en la Figura 71.

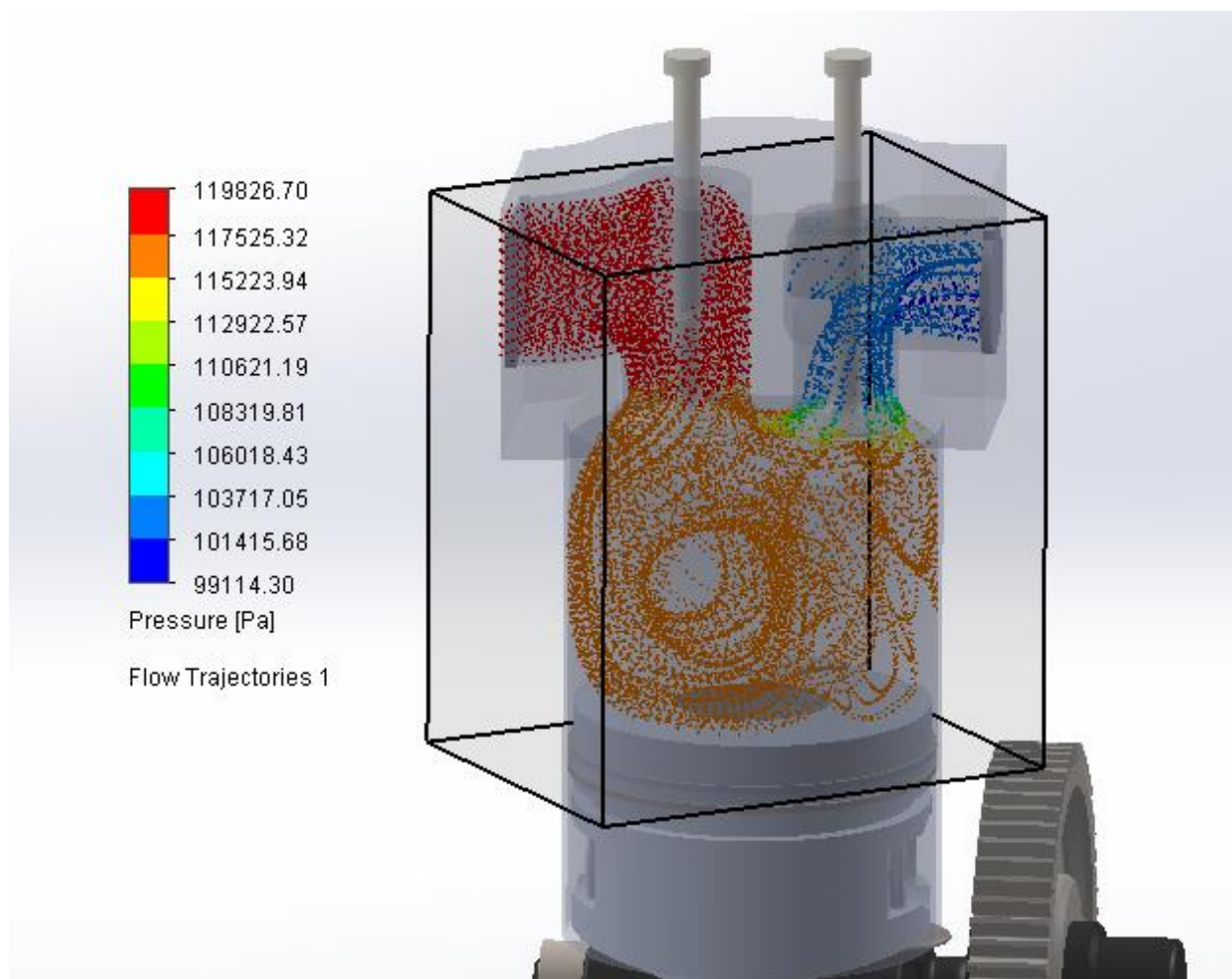


Figura 71.

La despresurización casi inmediata que sufría el fluido se mantiene también en esta simulación, sin embargo en menor medida, y dado que el volumen a llenar es más grande y la salida atmosférica posee cuantitativamente mayor superficie, se cree que esta simulación es más factible.

Al igual que la en la primera simulación la despresurización es constante (lo cual puede observarse en la imagen siguiendo la gama de colores que toma el fluido) a lo largo del flujo. Además se puede observar un fenómeno interesante durante el estrangulamiento que sufre el fluido al pasar por la válvula de escape, ya que se crea una depresión, lo que en esencia



ayudaría a la creación de fuerzas de succión del fluido, fenómeno que ocurre, como se ha explicado en este trabajo en apartados anteriores, y es buscado por los diseñadores para ayudar a entrar a los fluidos nuevos durante la admisión en el cilindro.

Las Figuras 72 y 73 representan la fuerza y la densidad frente al número de iteraciones realizadas por el programa hasta que estos dos parámetros convergen hacia una solución, respectivamente.

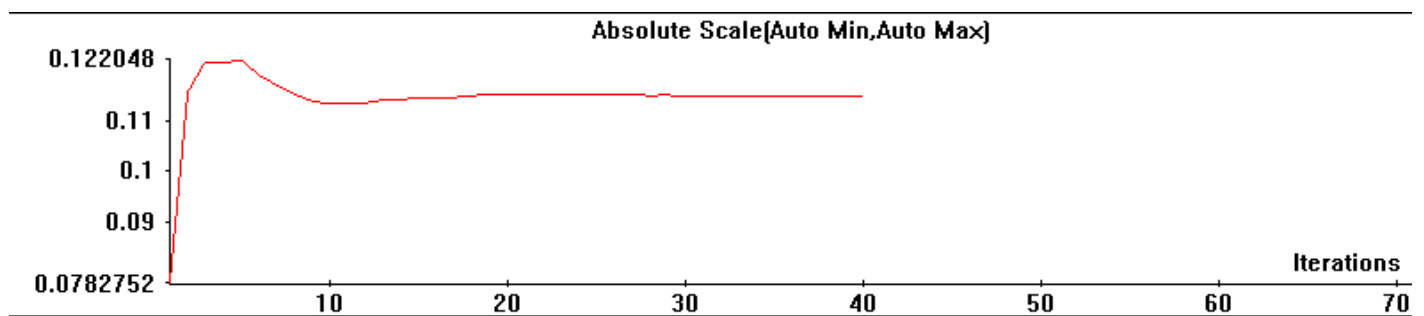


Figura 72.

Dato de convergencia: **0,115 N**

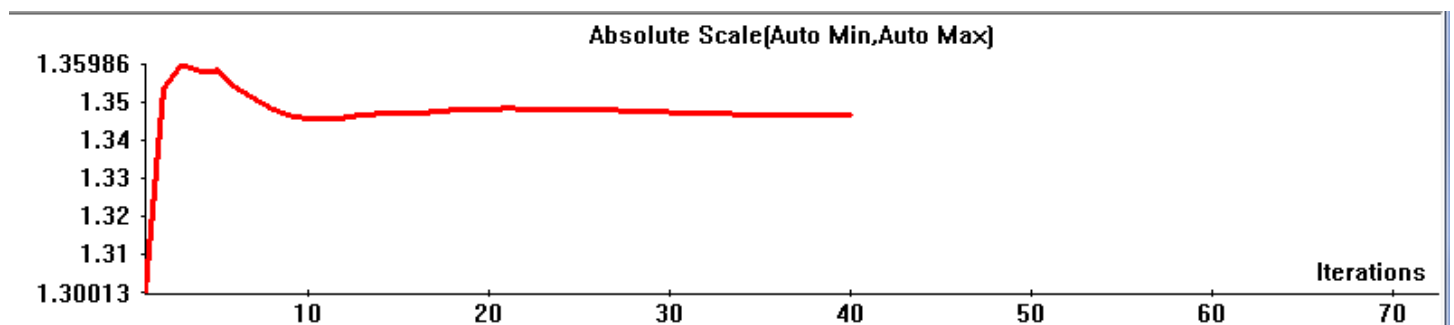


Figura 73.

Dato de convergencia: **1,347 Kg/m³**



7. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Únicamente se podrá discutir sobre los datos obtenidos de la densidad, puesto que los datos de fuerzas, necesarios para posteriormente calcular el par ejercido por el pistón, no tienen comparación todavía. Esto es debido a que no se ha experimentado con el motor modificado real en ese aspecto en el proyecto [1] y no se tienen datos del par.

Sin embargo, se puede comparar de una manera rápida y sencilla el dato obtenido de la experimentación para la densidad, **3,5097** [kg/m³], con los obtenidos a través de la simulación virtual, **1,2634** y **1,347** [kg/m³].

Como se puede analizar a simple vista, la simulación no ha tenido el alcance de verosimilitud que se esperaba de ella. El desarrollo de la simulación y las pequeñas imperfecciones del ensamblaje podrían ser las causantes de esta desviación en los resultados.

Aunque el resultado de estas simulaciones no haya sido satisfactorio, el perfeccionamiento de este trabajo tendrá como resultado la obtención de datos fiables y la predicción de los mismos si se sigue trabajando en esta línea de investigación.



8. NUEVAS LINEAS DE INVESTIGACIÓN

Como se ha podido comprobar a lo largo del desarrollo del proyecto, se han realizado numerosas aproximaciones, simplificaciones, reducciones, etc. Estas deben ser en la medida de lo posible eliminadas, para que la similitud con la realidad de estas configuraciones virtuales sea lo mayor posible. En este sentido, se habrá una nueva oportunidad a nuevos compañeros interesados en el diseño gráfico, para que perfeccionen lo que aquí se ha venido trabajando este curso académico e incluso amplíen los ensamblajes introduciendo el resto de componentes de los motores.

Por otro lado, las simulaciones no han alcanzado la relevancia que se esperaba de ellas, otros softwares, o versiones posteriores a este, pueden posibilitar mejores aproximaciones y cálculos, por lo que otra nueva línea de investigación se habrá a futuros estudiantes: la selección del software apropiado junto con el planteamiento de un ensayo realista y eficaz que permita no solo la recogida de datos ya conocidos por la experimentación, sino la simulación de datos con errores mínimos. Esta nueva vía aquí simplificada, oferta un gran abanico de posibilidades y proyectos que podrían abarcar desde la simulación de la distribución de aceite a través de los componentes del motor, la refrigeración, etc y por supuesto el ciclo termodinámico.



9. AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, querría agradecer su dedicación, seguimiento y apoyo del proyecto tanto al director de este, Alain Gil del Val, como al codirector José Carlos Urroz Unzueta, puesto que sin ellos la realización de este trabajo no podría haberse dado.

También quiero dar mis agradecimientos más sinceros por la disponibilidad y compañerismo que han demostrado mis compañeros de laboratorio y proyecto: Raquel Munuera Lario e Iñigo Echeverría Amescua; de los que este proyecto dependía directamente.

Por último recordar el esfuerzo que me han dedicado tanto el Departamento de Ingeniería Mecánica, Energetica y de Materiales como el resto de la comunidad estudiantil de la UPNA, ya que me han posibilitado el tener al alcance una infinidad de recursos, instrumentación, maquinaria, etc... para la consecución de mis objetivos durante el transcurso de mi carrera y en concreto durante el desarrollo de este Trabajo Final de Carrera.



10. REFERENCIAS

10.1. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Proyecto Final de Carrera de Raquel Munuera Lario titulado *“Modificaciones de un motor de combustión interna alternativo diésel para su funcionamiento con vapor a presión.*
- [2] Trabajo Fin de Grado de Iñigo Echeverría Amescua, *Estudio geométrico de la cadena cinemática de un motor diésel mono-cilíndrico modificado.*
- [3] Manual de instrucciones y uso asociado al software de diseño gráfico en 3D SolidWorks.
- [4] Apuntes de la asignatura *Maquinas térmicas* de 4º curso del Grado en Ingeniería Mecánica del profesor José Carlos Urroz Unzueta.

10.2. LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Figura que muestran la visión en tres dimensiones del elemento denominado árbol de levas, implementado en la plataforma de diseño gráfico SolidWorks,
- Figura 2. Figura que muestra el elemento árbol de levas real.
- Figuras 3. Figura que muestran la visión en tres dimensiones del elemento denominado árbol de levas modificado, implementado en la plataforma de diseño gráfico SolidWorks.
- Figuras 4. Figura que muestran la visión en tres dimensiones del elemento denominado biela, implementado en la plataforma de diseño gráfico SolidWorks.
- Figura 5. Figura que muestra el elemento biela real.
- Figura 6. Figura que muestra la visión en tres dimensiones del elemento denominado bulón, implementado en la plataforma de diseño gráfico SolidWorks.
- Figura 7. Figura que muestra la visión en tres dimensiones del elemento denominado chaveta, implementado en la plataforma de diseño gráfico SolidWorks.



Simulación y estudio en Solid Works de la cadena cinemática de un motor diésel mono-cilíndrico y de ese mismo motor modificado.

19 de Junio del 2015

- Figura 8. Figura que muestra la visión en tres dimensiones del elemento denominado cigüeñal, implementado en la plataforma de diseño gráfico SolidWorks.
- Figura 9. Figura que muestra el elemento cigüeñal real.
- Figuras 10. Figura que muestra la visión en tres dimensiones del elemento denominado eje de contrapesos, implementado en la plataforma de diseño gráfico SolidWorks.
- Figura 11. Figura que muestra la visión en tres dimensiones del elemento denominado engranaje del árbol de levas, implementado en la plataforma de diseño gráfico SolidWorks.
- Figura 12. Figura que muestra la visión en tres dimensiones del elemento denominado palpador, implementado en la plataforma de diseño gráfico SolidWorks.
- Figura 13. Figura que muestra la visión en tres dimensiones del elemento denominado Perno de unión, implementado en la plataforma de diseño gráfico SolidWorks.
- Figuras 14 y 15. Figuras que muestran la visión en tres dimensiones del elemento denominado Pistón, implementado en la plataforma de diseño gráfico SolidWorks, desde dos ángulos de vista diferentes.
- Figuras 16 y 17. Figuras que muestran el elemento pistón real, desde dos ángulos de vista diferentes.
- Figura 18. Figura que muestra la visión en tres dimensiones del elemento denominado segmento, implementado en la plataforma de diseño gráfico SolidWorks.
- Figura 19. Figura que muestra la visión en tres dimensiones del elemento denominado Semicojinete, implementado en la plataforma de diseño gráfico SolidWorks.
- Figura 20. Figura que muestra el elemento semicojinete real.
- Figura 21. Figura que muestra la visión en tres dimensiones del elemento denominado sombrerete, implementado en la plataforma de diseño gráfico SolidWorks.”
- Figura 22. Figura que muestra la visión en tres dimensiones del elemento denominado tope de válvula, implementado en la plataforma de diseño gráfico SolidWorks.
- Figura 23. Figura que muestra la visión en tres dimensiones del elemento denominado válvula de admisión, implementado en la plataforma de diseño gráfico SolidWorks.



Simulación y estudio en Solid Works de la cadena cinemática de un motor diésel mono-cilíndrico y de ese mismo motor modificado.

19 de Junio del 2015

- Figura 24. Figura que muestra la visión en tres dimensiones del elemento denominado válvula de escape, implementado en la plataforma de diseño gráfico SolidWorks.
- Figura 25. Figura que muestra el elemento válvula de admisión real. Está enfocada en mostrar la parte inferior de la pieza para poder observar el chaflán existente en la base de la pieza.
- Figura 26. Figura que muestra la visión en tres dimensiones del elemento denominado cilindro, implementado en la plataforma de diseño gráfico SolidWorks. Está orientada de manera que se pueda observarse con claridad la entrada del conducto de admisión.
- Figura 27. Figura que muestra la visión real de la entrada al conducto de admisión de manera que se pueda observarse con claridad la geometría citada en el texto adyacente.
- Figura 28. Figura que muestran la visión en tres dimensiones del elemento denominado Cilindro, implementado en la plataforma de diseño gráfico SolidWorks, con un ángulo de visión que permite observar el interior del cilindro.
- Figura 29. Figura que muestra el interior del cilindro, mostrando las geometrías que alojan las válvulas de admisión y escape.
- Figura 30. Figura que muestra el primer paso del ensamblaje de la cadena cinemática de ambos motores (real y modificado), en el que se observa los elementos: *biela, sombrerete, semicojinete, perno de unión y bulón.*
- Figura 31. “Figura que muestra el segundo paso del ensamblaje de la cadena cinemática de ambos motores (real y modificado), en el que además de los elementos observados en el anterior paso se han incorporado: *pistón, cigüeñal.*”
- Figura 32. “Figura que muestra el tercer paso del ensamblaje de la cadena cinemática de ambos motores (real y modificado), en el que además de los elementos observados en los anteriores pasos se han incorporado: *cilindro y segmento.*”
- Figura 33. Figura que muestra la incorporación del croquis de posiciones a la configuración anterior.
- Figura 34. Figura que muestra el cuarto paso del ensamblaje de la cadena cinemática de ambos motores (real y modificado), en el que además de los elementos observados en los anteriores pasos se ha incorporado el *eje de contrapesos.*



Simulación y estudio en Solid Works de la cadena cinemática de un motor diésel mono-cilíndrico y de ese mismo motor modificado.

19 de Junio del 2015

- Figura 35. Figura que muestra la incorporación del árbol de levas real, a la configuración común de la cadena cinemática.
- Figura 36. Figura que muestra la posición relativa entre los engranajes del árbol de levas real y el cigüeñal en la cadena cinemática, alcanzadas por medio del encaje de las marcas realizadas para tal fin en los sólidos.
- Figura 37. Figura que muestra la posición relativa entre los engranajes del árbol de levas real y el cigüeñal, señalizada mediante las marcas dispuestas en dichos elementos.
- Figuras 38 y 39. Figuras que muestran la configuración final y completa de la cadena cinemática del motor diésel real, desde dos ángulos de vista diferentes.
- Figuras 40 y 41. Figuras que muestran la configuración final y completa de la cadena cinemática del motor modificado, desde dos ángulos de vista diferentes.
- Figura 42. Figura que muestra el adelanto a la apertura de admisión durante el final la fase de escape en la configuración del motor diésel real.
- Figura 43. Figura que amplía la visión de las válvulas durante el avance a la apertura de admisión en la configuración del motor diésel real.
- Figura 44. Figura que amplía la visión de los palpadores durante el avance a la apertura de admisión en la configuración del motor diésel real.
- Figura 45. Figura que muestra el cierre de la válvula de admisión en la configuración del motor diésel real antes de que el pistón llegue al PMI.
- Figura 46. Figura que amplía la visión de las válvulas durante el cierre de la válvula de admisión en la configuración del motor diésel real antes de que el pistón llegue al PMI.
- Figura 47. Figura que amplía la visión de los palpadores durante el cierre de la válvula de admisión en la configuración del motor diésel real antes de que el pistón llegue al PMI.
- Figuras 48 y 49. Figuras que muestran la fase de compresión en la configuración del motor diésel real.



- Figura 50. Figura que muestra la fase de combustión/expansión en la configuración del motor diésel real.
- Figura 51. Figura que muestra el adelanto a la apertura de escape durante la fase de expansión/combustión en la configuración del motor diésel real.
- Figura 52. Figura que amplía la visión de las válvulas durante el adelanto a la apertura de escape durante la fase de expansión/combustión en la configuración del motor diésel real.
- Figura 53. Figura que amplía la visión de los palpadores durante el adelanto a la apertura de escape durante la fase de expansión/combustión en la configuración del motor diésel real.
- Figura 54. Figura que muestra el cruce de válvulas entre el final de la fase de escape y el comienzo de la fase de admisión en la configuración del motor diésel real.
- Figura 55. Figura que amplía la visión de las válvulas durante el cruce de válvulas entre el final de la fase de escape y el comienzo de la fase de admisión en la configuración del motor diésel real.
- Figura 56. Figura que amplía la visión de los palpadores durante el cruce de válvulas entre el final de la fase de escape y el comienzo de la fase de admisión en la configuración del motor diésel real.
- Figura 57. Figura que muestra el avance a la apertura de admisión durante el final de la fase de escape en la configuración del motor modificado.
- Figura 58. Figura que amplía la visión de las válvulas durante el avance a la apertura de admisión en la configuración del motor modificado.
- Figura 59. Figura que amplía la visión de los palpadores durante el avance a la apertura de admisión en la configuración del motor modificado.
- Figura 60. Figura que muestra el cruce de válvulas hacia el final de la fase de admisión en la configuración del motor modificado.
- Figura 61. Figura que amplía la visión de las válvulas durante el cruce de válvulas hacia el final de la fase de admisión en la configuración del motor modificado.



Simulación y estudio en Solid Works de la cadena cinemática de un motor diésel mono-cilíndrico y de ese mismo motor modificado.

19 de Junio del 2015

- Figura 62. Figura que amplía la visión de los palpadores durante el cruce de válvulas hacia el final de la fase de admisión en la configuración del motor modificado.
- Figura 63. Figura que muestra el cruce de válvulas hacia el final de la fase de escape en la configuración del motor modificado.
- Figura 64. Figura que amplía la visión de las válvulas durante el cruce de válvulas hacia el final de la fase de escape en la configuración del motor modificado.
- Figura 65. Figura que amplía la visión de los palpadores durante el cruce de válvulas hacia el final de la fase de escape en la configuración del motor modificado.
- Figura 66. Figura que muestra el volumen de control, salida y entradas del fluido de trabajo, en la simulación de la admisión de aire para la configuración del motor modificado.
- Figura 67. Figura que muestra la simulación del fluido durante un momento exacto de la fase de admisión de aire para la configuración del motor modificado.
- Figura 68. Figura que muestra la gráfica de fuerza en la superficie del pistón frente a iteraciones, en la simulación de admisión.
- Figura 69. Figura que muestra la gráfica de densidad del fluido frente a iteraciones, en la simulación de admisión.
- Figura 70. Figura que muestra el volumen de control, salida y entradas del fluido de trabajo, en la simulación de cruce de válvulas, para la configuración del motor modificado.
- Figura 71. Figura que muestra la simulación del fluido durante un momento exacto correspondiente al cruce de válvulas para la configuración del motor modificado.
- Figura 72. Figura que muestra la gráfica de fuerza en la superficie del pistón frente a iteraciones, en la simulación de admisión.
- Figura 73. Figura que muestra la gráfica de densidad del fluido frente a iteraciones, en la simulación de admisión.

10.3. LISTA DE TABLAS

- Tabla 1. Tabla contenedora de los datos escogidos para realizar la simulación.